

基于网络单纯形的虚拟网络映射算法

王志臻¹, 郑 焯¹, 陈 晨¹, 田洪亮²

(1. 中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230027; 2. 中兴通讯股份有限公司, 广东 深圳 518057)

摘 要: 在软件定义网络(SDN)架构中,虚拟网络映射是实现网络虚拟化的关键技术。针对虚拟网络映射算法映射成本高、执行时间长的问题,提出一种虚拟网络映射算法 Simplex-VNM。在节点映射阶段,对虚拟节点按照资源需求进行排序,综合考虑节点连通性和映射成本选择映射节点。在链路映射阶段,采用网络单纯形算法求解最小费用流问题。实验结果表明,相比于 NA-PVNM 和 Improved-vnmFlib 算法,该算法具有更低的映射成本和更短的运行时间。

关键词: 软件定义网络;虚拟网络映射;节点连通性;网络单纯形;效用函数;性能指标

中文引用格式:王志臻,郑焯,陈晨,等. 基于网络单纯形的虚拟网络映射算法[J]. 计算机工程,2019,45(4):13-17,24.

英文引用格式:WANG Zhizhen, ZHENG Quan, CHEN Chen, et al. Virtual network mapping algorithm based on network simplex[J]. Computer Engineering, 2019, 45(4):13-17, 24.

Virtual Network Mapping Algorithm Based on Network Simplex

WANG Zhizhen¹, ZHENG Quan¹, CHEN Chen¹, TIAN Hongliang²

(1. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Zhongxing Telecommunication Equipment Corporation, Shenzhen, Guangdong 518057, China)

[Abstract] In the Software Defined Network (SDN) architecture, virtual network mapping is the key technology to achieve network virtualization. To solve the problems of high cost of mapping and long running time, a virtual network mapping algorithm named Simplex-VNM is proposed. In the stage of node mapping, virtual nodes are ranked according to resources requirements and search order, then the mapping node is chosen according to the node connectivity and mapping costs. In the stage of link mapping, the process is equivalent to the minimum cost flow problem which can be solved by the network simplex algorithm. Experimental results show that, compared with NA-PVNM and Improved-vnmFlib algorithms, the proposed algorithm has lower mapping cost and shorter running time.

[Key words] Software Defined Network (SDN); virtual network mapping; node connectivity; network simplex; utility function; performance index

DOI:10.19678/j.issn.1000-3428.0050008

0 概述

随着互联网的发展,网络架构“僵化”问题日益严重,软件定义网络(Software Defined Network, SDN)与网络虚拟化技术的出现为该问题的解决提供了新的契机。SDN将网络设备的控制面与数据面分离,实现网络流量的灵活控制,是一种可靠的网络虚拟化实现方式。网络虚拟化技术允许多个虚拟网络运行在同一个底层物理网络中,是构建新一代网络体系架构的重要支撑性技术^[1]。虚拟网络映射是网络虚拟化研究的基础内容之一^[2],其主要目标是在满足节点和链路资源约束的基础上,将虚拟网络

映射到物理网络上,实现底层资源的高效利用。

虚拟网络映射目前面临3大难题:资源约束,拓扑多样化,在线请求的即时性^[3]。这些难题导致在多项式时间内很难求出它的最优解。虚拟网络映射是NP-Hard问题,一般通过设计启发式算法求出近似解,目前大部分研究主要以提高物理网络收益和减少映射时间为目标。

虚拟网络映射可以分解成节点映射和链路映射^[4]。一般采用启发式算法求解节点映射问题,然后在已知源节点和目的节点的基础上,将链路映射转换成最小费用流问题^[5],再使用最短路径算法或消圈算法完成链路映射。文献[6-7]提出基于同构

基金项目:中兴通讯科研项目“接入网面向内容服务网络的研究项目”(2017ZTE04-09)。

作者简介:王志臻(1993—),男,硕士研究生,主研方向为未来网络、虚拟网络映射;郑焯(通信作者),副教授;陈晨,硕士研究生;田洪亮,博士。

收稿日期:2018-01-08 **修回日期:**2018-03-01 **E-mail:**qzheng@ustc.edu.cn

图搜索的 vnmFilb 算法及其改进算法 Improved-vnmFilb。文献[8]提出一种基于节点资源度优先级和图特征分析的启发式剪枝搜索算法。文献[9]提出基于介数中心性的算法,考虑节点相邻链路带宽和对节点进行排序。文献[10]考虑节点的有效性和适应性,提出一种基于节点抗毁能力的映射算法。文献[11]采用 TOPSIS 算法将虚拟节点和物理节点的重要性相匹配,减少运行时间和映射成本。文献[12]提出一种基于节点相邻性与路径综合感知的虚拟网络映射算法 NA-PVNM。上述研究大多只考虑节点位置、紧凑性、映射成本其中一个因素,没有综合考虑这些因素对算法性能的影响。此外,绝大多数文献都是基于最短路径算法进行链路映射,没有考虑链路映射时间过长的局限性。

在现有研究的基础上,针对虚拟网络映射成本高、运行时间长的问题,本文提出一种基于节点连通性和网络单纯形的虚拟网络映射算法 Simplex-VNM。在节点映射阶段综合考虑节点位置和映射成本 2 个因素,在链路映射阶段使用网络单纯形算法^[13-15]。网络单纯形的时间复杂度与具体的实现方式有关,总体效果优于最短路径算法,但是这也增加了它的实现难度。文献[13-14]基于原始-对偶法实现网络单纯形法,文献[15]针对原始-对偶法的初始可行解和迭代更新顺序进行改进。本文实现的网络单纯形算法综合了以上文献的研究成果,分别设计适用于稀疏图和稠密图的算法。

1 虚拟网络映射问题描述

1.1 网络模型

虚拟网络映射的主要研究目标是在满足虚拟节点和虚拟链路资源需求的同时,实现最终的网络收益最大化。

在虚拟网络映射模型中,物理网络由一个加权无向图 $G_s = (N_s, E_s, C_s, B_s)$ 表示,其中, N_s 代表物理节点, E_s 代表物理链路, C_s 代表物理节点的资源, B_s 代表物理链路的资源;虚拟网络由图 $G_v = (N_v, E_v, C_v, B_v)$ 表示,其中, N_v 代表虚拟节点, E_v 代表虚拟链路, C_v 代表虚拟节点需求, B_v 代表虚拟链路需求。 $M(G_v, G_s)$ 为将虚拟网络请求 G_v 映射到物理网络 G_s 上的网络映射函数,定义如下:

$$M(G_v, G_s) : (N_v, E_v, C_v, B_v) \rightarrow (N_s, E_s, C_s, B_s) \quad (1)$$

将 $M(G_v, G_s)$ 分解成节点映射和链路映射 2 个函数,分别用 $M_n(G_v, G_s)$ 和 $M_e(G_v, G_s)$ 表示:

$$M_n(G_v, G_s) : (N_v, C_v) \rightarrow (N_s, C_s) \quad (2)$$

$$M_e(G_v, G_s) : (E_v, B_v) \rightarrow (E_s, B_s) \quad (3)$$

1.2 性能指标

虚拟网络映射问题是在节点和链路资源约束下的多目标优化问题,主要的评价指标有虚拟网络的请求接受率、收益开销比^[3]、映射时间^[7]等。本文以映射时间和物理网络的收益开销比作为性能指标来评价算法性能,研究目标为在满足虚拟网络节点和链路需求的基础上,最大化收益开销比、最小化映射时间。本文针对单个虚拟网络的映射效率进行研究,不考虑映射后网络的运行效率,映射的收益开销比可以用映射成本表示。

虚拟网络映射的总成本 $C(G_v)$ 包含节点成本和链路成本 2 部分:

$$C(G_v) = \sum_{e_v \in E_v} C_e(e_v) + \sum_{n_v \in N_v} C_n(n_v) \quad (4)$$

其中, $C_e(e_v)$ 代表链路映射成本, $C_n(n_v)$ 代表节点映射成本。

1.3 约束条件

在最小化映射成本的前提下,虚拟网络映射还应该满足一些约束条件。假设有虚拟节点 n_v , 对应的映射物理节点为 n_s , 则 n_s 的可用节点资源应该大于或等于 n_v 的需求 $C_v(n_v)$, 即:

$$C_s(M(n_v)) \geq C_v(n_v), \forall n_v \in V_v \quad (5)$$

现有研究大多面向节点不可分拆、链路可分流的情况,也就是一个虚拟节点只能映射到单个且互不相同的物理节点,一条虚拟链路可以映射到多条物理链路,即:

$$M_n(i) \neq M_n(j), \forall i, j \in V_v, i \neq j \quad (6)$$

虚拟链路 $l_v = (i, j)$, 定义其映射到的路径集合为 $P_M(l_v)$, 则有 $|P_M(l_v)| \geq 1$ 。

定义路径 $p \in P_M(l_v)$ 为 l_v 分配带宽 $B(l_v, p)$, 则在链路映射过程中物理链路 l_s 上必须有足够的带宽资源 $B_s(l_s)$, 即:

$$B_s(l_s) \geq \sum_{p: p \in P_M(l_v), l_s \in p} B(l_v, p), \forall l_s \in E_s \quad (7)$$

2 Simplex-VNM 算法

本节详细介绍 Simplex-VNM 算法,按照算法的执行流程分为虚拟节点排序、虚拟节点映射、虚拟链路映射 3 部分展开。

2.1 虚拟节点排序

对于一个具体的虚拟网络请求,假设其中包含 k 个虚拟节点,由于物理网络节点和链路资源的有限性,需求大的虚拟节点难以完成映射,优先映射这类虚拟节点可以提高映射效率。同时,为了保证虚拟节点映射的紧凑性,先选择与已映射集合有关联的虚拟节点进行映射,定义虚拟节点需求 $C_R(n_v)$:

$$C_R(n_v) = C(n_v) \sum_{l \in L(n_v)} B(l) \quad (8)$$

其中, $C(n_v)$ 代表 n_v 的节点需求, $\sum_{l \in L(n_v)} B(l)$ 代表其链路需求, $L(n_v)$ 代表所有与其相关联的链路集合。

2.2 虚拟节点映射

虚拟节点映射算法基于节点连通性和映射成本实现,即在节点映射过程中考虑节点之间的连通性对物理节点进行排序,然后对排序靠前的物理节点,选择映射成本最低的物理节点作为结果。

定义所有与节点 n_v 相关联的虚拟节点在物理网络中的映射节点集合为 M 。定义物理节点 n_s 与集合 M 的连通性 $N_{\text{rank}}(n_s)$,按照连通性大小进行排序:

$$N_{\text{rank}}(n_s) = \frac{\sum_{n_r \in M} C_{\text{available}}(n_r, n_s) C(n_s)}{D(n_r, n_s)} \quad (9)$$

其中, $C_{\text{available}}(n_r, n_s)$ 代表物理节点 n_r 与 n_s 之间的相关性,在实际计算中用最大流来表示, $D(n_r, n_s)$ 代表两点之间的距离, $C(n_s)$ 代表节点的可用资源。综上,节点连通性综合考虑了节点之间可行流的大小、节点之间距离和节点可用资源3个指标。

按照节点连通性由大到小排序之后,进行节点映射和链路的映射,根据每一次映射结果,统计当前节点映射成本和所有相关链路的映射成本作为效用函数 $C_{\text{total}}(n_s)$ 评价物理节点的最终效用。可以看出,虚拟节点映射需要依据映射总成本来筛选映射节点,而映射总成本包括链路映射成本,即:

$$C_{\text{total}}(n_s) = \sum_{n_m \in M} \text{CostLink}(n_s, n_m) + \text{CostNode}(n_s) \quad (10)$$

其中, $\text{CostLink}(n_s, n_m)$ 代表映射到物理节点 n_s 的链路映射成本, $\text{CostNode}(n_s)$ 代表其节点映射成本。 $C_{\text{total}}(n_s)$ 代表其总映射成本,以此为效用函数选择映射节点,可以有效降低总映射成本,同时物理节点已经按照连通性由大到小排序,选择连通性比较大的节点计算 $C_{\text{total}}(n_s)$ 的值,既保证了后续映射的成功率,又减小了算法的搜索空间。

节点映射算法如算法1所示。

算法1 节点映射算法

输入 $(V_v, E_v), (V_s, E_s)$

输出 $\{M(n_v) \mid \forall n_v \in V_v\}, \{M(l) \mid \forall l \in E_v\}$

1. $M = \emptyset, D_i = \emptyset, i = 0, \text{step} = 0, N$
2. for all $n_v \in V_v$
3. count the $C_R(n_v)$ of n_v
4. end for
5. arrange n_v in descending according to $C_R(n_v)$
6. for all $n_v^i \in V_v$
7. if $(M = \emptyset)$
8. select $n_s^i \in V_s$ which has biggest $C(n_s^i)$
9. end if
10. else

11. order $n_s^i \in V_s$ by $N_{\text{rank}}(n_s^i)$
12. for all $n_s^i \in V_s$ and step $< N$
13. count the $C_{\text{total}}(n_s^i)$, add the step
14. $n_s^i \rightarrow D_i$
15. end for
16. select $n_s^i \in D_i$ which has minimum $C_{\text{total}}(n_s^i)$
17. $n_s^i \rightarrow M$
18. end else
19. end for

在算法1中,步骤1代表初始化, M, D_i 分别代表已经映射到的物理节点的集合和虚拟节点的预选物理节点集合,步骤2~步骤5代表虚拟节点排序的过程,步骤7~步骤9代表第1个虚拟节点映射过程,步骤10~步骤18代表其他虚拟节点映射过程,其中步骤11代表物理节点排序过程,步骤12~步骤15代表选择按照连通性大小排序后的前 N 个节点的过程,步骤16代表物理节点的最终筛选过程。

步骤11~步骤16的最终筛选依据 $C_{\text{total}}(n_s^i)$ 的含义为总映射成本。其中,节点映射成本相对容易求得,链路映射成本求解过程将在第2.3节介绍。

2.3 虚拟链路映射

链路映射成本求解可转化为最小费用流问题来解决,即在节点 i 和节点 j 之间流量大小固定的条件下,找到一个花费最小的方案。本文基于文献[13,15]的算法,对网络单纯形算法做了初步的实现,以最短的时间寻找链路映射的最优解。

设 $G = (N, A)$, 弧 $(i, j) \in A$ 的权 c_{ij} 表示单位流量的费用, u_{ij} 代表其容量限制, $b(i)$ 代表节点的供需函数。

对于最小费用流问题的任意一个可行解 x , 如果 $0 < x_{ij} < u_{ij}$, 则称弧 (i, j) 为自由弧; 如果 $x_{ij} = 0$ 或者 $x_{ij} = u_{ij}$, 则称弧 (i, j) 为限制弧。可以将弧集合 A 划分成3个子集: T 代表自由弧集合, L 代表流量为0的限制弧集合, U 代表流量为上界的限制弧集合。

定义顶点 $i \in N$ 的势函数 $\pi(i)$, 则弧的检验数 c_{ij}^π 为:

$$c_{ij}^\pi = c_{ij} - \pi(i) + \pi(j) \quad (11)$$

定义迭代的终止条件。设 (T, L, U) 为最小费用流问题的一个可行解, 如果弧的检验数 c_{ij}^π 满足以下3个条件:

$$c_{ij}^\pi = 0, \forall (i, j) \in T \quad (12)$$

$$c_{ij}^\pi > 0, \forall (i, j) \in L \quad (13)$$

$$c_{ij}^\pi < 0, \forall (i, j) \in U \quad (14)$$

则 (T, L, U) 为最小费用流问题的一个最优解。网络单纯形算法求最小费用流的步骤如算法2所示。

算法2 链路映射算法

输入 $G = (N, A), s, t, f$

输出 Minimum cost flow f of graph G

1. $b(s) = f, b(t) = -f, \{b(i) = 0 \mid \forall (i! = s \& \& i! = t)\}$
2. find a feasible $(T, L, U) \rightarrow A, \pi(s) = 0$
3. for node $i \in N$ and $i! = s$
4. count $\pi(i)$ of node i
5. end for
6. for arc $(i, j) \in A$
7. count c_{ij}^π of arc (i, j)
8. end for
9. while exist arc (i_k, j_k) not satisfy (13) or (14)
10. $(i_k, j_k) \rightarrow T$
11. while $c_{i_k, j_k}^\pi \neq 0$
12. for node i_p associate with (i_k, j_k)
13. adjust $\pi(i_p)$ of node i_p
14. end for
15. for arc $(i, j) \in A$
16. adjust c_{ij}^π of arc (i, j)
17. end for
18. end while
19. end while

网络单纯形算法是以流量圈为单位,迭代调整弧流量的过程,以下详细介绍单次调整的具体过程:

1) 步骤1~步骤2:生成初始可行解,包括每个节点 i 对应节点供需函数 $b(i)$,每条弧 (i, j) 的对应流 x_{ij} 。

2) 步骤3~步骤8:令源节点的初始势为0, T 集合弧的检验数 $c_{ij}^\pi = 0$ 。根据式(11)计算所有弧的检验数 c_{ij}^π 和节点势函数 $\pi(i)$ 。

3) 步骤9~步骤10:找出不满足最优解条件的弧 (i, j) , 添加违规弧到生成树,根据圈流量守恒原理调整流量分配。

4) 步骤11~步骤18:在新的流量分配原则下,调整相关节点的势函数 $\pi(i)$ 和弧的检验数 c_{ij}^π ,使得 $\forall (i, j) \in T, c_{ij}^\pi = 0$ 。

5) 按照网络单纯形算法一一映射与节点 n_s^i 相关联的链路,计算 $C_{total}(n_s^i)$ 对应算法1中节点映射算法的步骤13,最终完成整个虚拟网络映射算法。

3 性能评估与分析

实验通过 MATLAB 进行仿真评估。采用 GT-ITM 拓扑产生器随机生成底层物理网络和虚拟网络请求。分别在小规模拓扑和大规模拓扑结构下,将本文提出的 Simplex-VNM 算法映射成本和算法运行时间与文献[6]提出的 Improved-vnmFlib 算法、文献[12]提出的 NA-PVNM 算法进行比较。

3.1 小规模拓扑

在小规模拓扑下的仿真中,底层基础设施模拟中国教育和科研计算机网络拓扑。如图1所示,底层物理网络包含10个节点、17条链路,其中,节点总资源大小为100,链路总带宽大小为200。节点和链路的单位计算容量成本、带宽成本均为1^[6]。

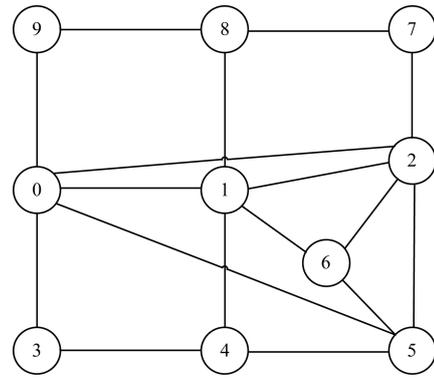


图1 小规模网络拓扑

虚拟网络节点数服从[3,9]均匀分布,它们之间以 $p=0.5$ 的概率存在链路,节点和链路的需求服从[10,50]均匀分布。

基于图1小规模拓扑分别运行 Simplex-VNM、Improved-vnmFlib、NA-PVNM 3种算法,图2和图3分别代表3种算法的映射成本和运行时间。

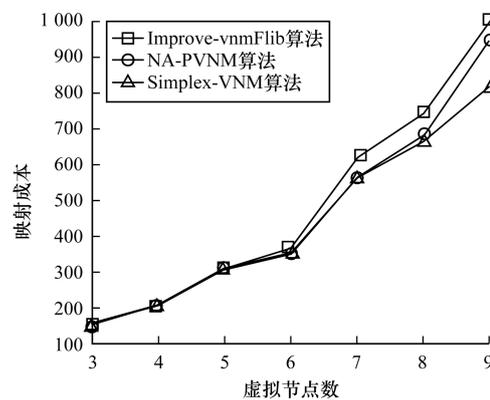


图2 在小规模拓扑下映射成本的变化趋势

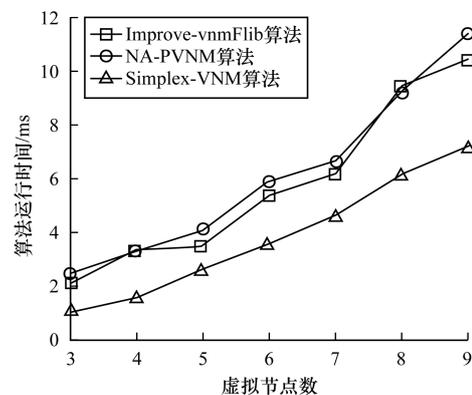


图3 在小规模拓扑下运行时间的变化趋势

从映射成本来看,3种算法的映射成本随着虚拟节点数递增。在横向比较下,Simplex-VNM 算法总体映射成本优于另外2种启发式算法,NA-PVNM 算法映射成本优于 Improved-vnmFlib 算法。这是因为,Simplex-VNM 算法在节点映射的过程中综合考虑了节点映射成本和节点间连通性的因素;NA-PVNM 算法只是选择了连通性最好的物理节

点, 并未考察其余连通性较好、映射成本更低的节点; Improved-vmnFlib 算法基于映射的距离限制来调整节点的紧凑程度, 未考虑节点之间连通性的关系。

从算法运行时间来看, 3 种算法的运行时间随着虚拟网络映射请求中的虚拟节点数目增加而变大。横向比较下, Simplex-VNM 算法总体运行时间优于另外 2 种启发式算法。这是因为, Simplex-VNM 算法在启发式算法上综合考虑了节点连通性和映射成本, 花费的时间更多。但是由于其在链路映射阶段采用了高效率的网络单纯形算法, 比传统的最短路径算法复杂度更低, 而链路映射的时间占比在整个映射过程中较高, 因此 Simplex-VNM 的时间复杂度更低。

基于最短路径的最小费用流算法的时间复杂度为 $O(FE|bV)$, 其中, F 代表链路流量需求大小, E 代表物理网络链路总数, V 代表物理节点总数。本文实现的网络单纯形算法时间复杂度为 $O((m+n)mnC^2F)$, 其中, C 代表物理链路最大带宽成本, n 代表节点流量需求不为 0 的物理节点个数, m 代表流量不为 0 的物理链路数量, 相关证明见文献[4]。在本文的最小费用流模型下, 网络单纯形算法时间复杂度更优。

3.2 大规模拓扑

在大规模拓扑下的仿真中, 底层物理网络包含 160 个节点、400 余条链路, 节点间的连接概率为 $P = \beta e^{-\frac{\alpha d}{L}}$, 其中, d 代表节点距离, L 代表节点产生范围, α 、 β 代表网络特征参数。节点资源服从 [50, 150] 均匀分布, 单位计算容量成本服从 [1, 5] 均匀分布, 链路可用带宽容量服从 [1, 100] 均匀分布, 单位带宽成本服从 [1, 10] 均匀分布^[12]。

虚拟网络节点数服从 [3, 15] 均匀分布, 它们的连接概率为 $p = 0.5$, 节点和链路的需求服从 [10, 50] 区间均匀分布。

基于以上仿真环境再次运行 3 种映射算法, 结果如图 4、图 5 所示。

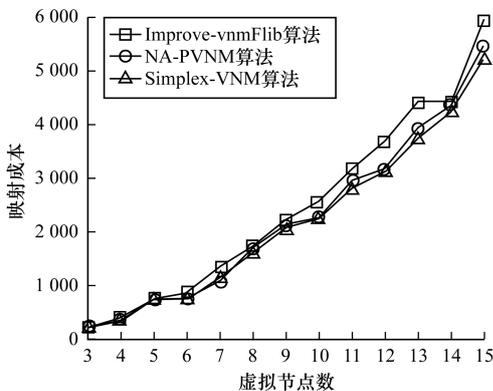


图 4 在大规模拓扑下映射成本的变化趋势

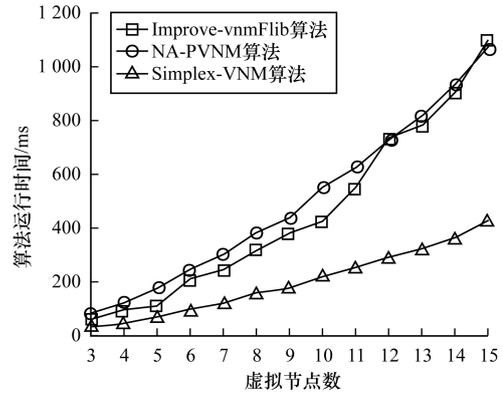


图 5 在大规模拓扑下运行时间的变化趋势

在大规模拓扑结构下的实验结果表明, Simplex-VNM 算法在总体映射成本和运行时间上的优势仍然存在。在个别虚拟请求中, Simplex-VNM 算法的映射成本比 NA-PVNM 算法高, 这是由于 Simplex-VNM 算法在启发式搜索过程中每次都取最小的映射成本作为映射结果, 容易陷入局部最优解。本文将在后续研究中结合模拟退火、蚁群算法等智能算法对节点映射阶段进一步改进。

根据算法的运行时间结果还可以看出, 随着底层物理网络规模的变大, Simplex-VNM 算法的运行时间优势较另外 2 种算法更加明显。这是因为随着物理网络拓扑的增大, 链路映射在整个映射过程中的时间占比更高, 同时网络单纯形算法相对于最短路径算法时间复杂度的优势更为明显。

4 结束语

为在 SDN 中进行高效虚拟网络映射, 本文提出一种基于启发式搜索和网络单纯形的虚拟网络映射算法。该算法在节点映射阶段把物理节点的连通性作为预筛选标准, 虚拟节点的最终映射成本作为效用函数, 与传统启发式算法相比降低了算法的映射成本。在链路映射阶段实现了网络单纯形算法, 相较于传统的最短路径算法降低了映射的时间复杂度。实验结果表明, 在小规模 and 大规模物理网络上, 本文算法的映射成本和运行时间均优于 NA-PVNM 和 Improved-vmnFlib 算法。下一步将在面向内容服务的网络^[16]中进行虚拟网络映射研究。

参考文献

- [1] 彭利民. 基于广度优先搜索的虚拟网络映射算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(2): 117-122.
- [2] 程祥, 张忠宝, 苏森, 等. 虚拟网络映射问题研究综述[J]. 通信学报, 2011, 32(10): 143-151.
- [3] FISCHER A, BOTERO J F, BECK M T, et al. Virtual network embedding: a survey[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(4): 1888-1906.
- [4] 邹晓辉, 孙静. 基于多商品流模型的虚拟链路映射[J]. 智能计算机与应用, 2013, 3(6): 107-108.
- [5] 鲁海燕. 最小费用网络流的若干新问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (下转第 24 页)

参考文献

- [1] YAN J, YUN X, WU Z. Online traffic classification based on co-training method [C]//Proceedings of the 13th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. Beijing, China: [s. n.], 2012:125-136.
- [2] SUN M, CHEN J. Research of the traffic characteristics for the real time online traffic classification [J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2011, 18(3):92-98.
- [3] 彭立志. 互联网流量识别研究综述[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2016, 30(2):95-104.
- [4] 王丽冲, 姚秀娟, 闫毅. 一种基于 OpenFlow 的软件定义卫星网络架构设计方案[J]. 电子设计工程, 2016, 24(17):85-89.
- [5] 杨力, 孔志翔, 石怀峰. 软件定义空间信息网络多控制器动态部署策略[J]. 计算机工程, 2018, 44(10):58-63.
- [6] NAZARI S, DU P, GERIA M, et al. Software defined naval network for satellite communications [C]//Proceedings of 2016 IEEE Military Communications Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016:124-136.
- [7] ELMASRY G, MCCLATCHY D, HIINRICH R, et al. A software defined networking framework for future airborne connectivity [C]//Proceedings of ICNS' 17. Herndon, USA: IEEE Press, 2017:215-224.
- [8] AMARAL P, DINIS J, PINTO P, et al. Machine learning in software defined networks: data collection and traffic classification [C]//Proceedings of the 24th International Conference on Network Protocol. Singapore: [s. n.], 2016:321-329.
- [9] BERNAILLE L, TEIXEIRA R, AKODKENOU I, et al. Traffic classification on the fly [C]//Proceedings of ACM SIGCOMM' 06. New York, USA: ACM Press, 2006:158-167.
- [10] ESTE A, GRINGOLI F, SALGARELLI L. On the stability of the information carried by traffic flow features at the packet level [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2009, 39(3):13-18.
- [11] 赵树鹏, 陈贞翔, 彭立志. 基于流中前 5 个包的在线流量分类特征[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2012, 26(2):156-160.
- [12] 刘珍, 王若愚, 蔡先发, 等. 互联网流量分类中流量特征研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(1):8-13.
- [13] 柏骏, 夏靖波, 吴吉祥, 等. 实时网络流量分类研究综述[J]. 计算机科学, 2013, 40(9):8-15.
- [14] BERNAILLE L, TEIXEIRA R, SALAMATIAN K. Early application identification [C]//Proceedings of CoNEXT'06. New York, USA: ACM Press, 2006:147-158.
- [15] 彭建芬, 周亚建, 王枫, 等. TCP 流量早期识别方法[J]. 应用科学学报, 2011, 29(1):73-77.
- [16] MOORE A W, ZUEV D. Internet traffic classification using Bayesian analysis techniques [C]//Proceedings of International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. Alberta, Canada: [s. n.], 2005:50-60.
- [17] WEI L, ABDIN K, DANN R, et al. Approaching real-time network traffic classification [D]. London, UK: London University, 2006.
- [18] 张剑, 钱宗珏, 寿国础, 等. 在线聚类的网络流量识别[J]. 北京邮电大学学报, 2011, 34(1):103-106.
- [19] 郭翔宇, 王魏. 一种改进的协同训练算法: Compatible Co-training [J]. 南京大学学报(自然科学版), 2016, 52(4):662-671.
- [20] ZHOU Z H, LI M. Tri-Training: exploiting unlabeled data using three classifiers [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2005, 17(11):1259-1541.
- [21] 徐鹏, 林森. 基于 C4.5 决策树的流量分类方法[J]. 软件学报, 2009, 20(10):2692-2704.

编辑 索书志

(上接第 17 页)

- [6] 狄浩. 虚拟网络的高效和可靠映射算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [7] DI H, YU H, ANAND V, et al. Efficient online virtual network mapping using resource evaluation [J]. Journal of Network and Systems Management, 2012, 20(4):468-488.
- [8] 刘彩霞, 李凌书, 汤红波, 等. 基于子图同构的 vEPC 虚拟网络分层协同映射算法 [J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5):1170-1177.
- [9] FENG M, LIAO J X, WANG J Y, et al. Topology-aware virtual network embedding based on multiple characteristics [C]//Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014:2956-2962.
- [10] 李振涛, 孟相如, 赵志远, 等. 基于节点抗毁能力感知的虚拟网络可靠映射算法 [J]. 计算机工程, 2017, 43(9):62-67.
- [11] 龚水清, 陈靖, 黄聪会, 等. 信任感知的安全虚拟网络映射算法 [J]. 通信学报, 2015, 36(11):180-189.
- [12] 赵志远, 孟相如, 苏玉泽, 等. 基于节点邻近感知与路径综合评估的虚拟网络映射算法 [J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8):1979-1985.
- [13] KELLY D J, COMM B, O'NEILL G M. The minimum cost flow problem and the network simplex solution method [D]. Dublin, Ireland: University College Dublin, 1991.
- [14] MURAMATSU M. On network simplex method using the primal-dual symmetric pivoting rule [J]. Journal of the Operations Research Society of Japan, 2017, 43(1):149-161.
- [15] WANG I L, LIN S J. A network simplex algorithm for solving the minimum distribution cost problem [J]. Journal of Industrial and Management Optimization, 2017, 5(4):929-950.
- [16] ZHANG L X, DEBORAH E, JEFFREY B, et al. Named Data Networking (NDN) project [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2010, 1892(1):227-234.

编辑 刘盛龄